

свинца в сверхпроводящем состоянии не превышало 10^{-18} Ом·см, тогда как при T , превышающей T_c , т. е. в нормальном состоянии, свинец имел $\rho=10^{-9}$ Ом·см. В настоящее время с использованием очень чувствительных методов измерения тока в сверхпроводящем кольце установлено, что скачок сопротивления составляет по крайней мере 14 порядков. Удельное сопротивление металла в сверхпроводящем состоянии оценивается не более чем 10^{-23} Ом·см, т. е. оно в 10^{17} раз меньше удельного сопротивления меди при комнатной температуре. Время, требуемое для затухания тока, наведенного в таком сверхпроводящем кольце, составляет не менее 100000 лет. Таким образом, можно с полным правом считать, что в сверхпроводящем состоянии электрическое сопротивление действительно исчезает. Следует заметить однако, что на переменном токе при $T < T_c$ небольшие потери существуют на всех частотах.

Заметим в заключение, что нулевое сопротивление, которым при $T=0$ К должен был бы обладать гипотетический идеальный кристалл, не является сверхпроводимостью. Введение в такой кристалл примесей приводит к возникновению остаточного сопротивления. Переход в сверхпроводящее состояние может произойти и в сильно загрязненном кристалле.

11.2. ТЕМПЕРАТУРА СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ПЕРЕХОДА

В течение короткого времени после открытия явления сверхпроводимости Камерлинг-Оннесу удалось показать, что не только ртуть, но и другие металлы, например, свинец и олово, переходят при низких температурах в сверхпроводящее состояние. Как уже отмечалось выше, в настоящее время сверхпроводимость обнаружена примерно у половины металлических элементов и огромного числа соединений и сплавов. Измеренные значения критических температур T_c для металлических элементов приведены в таблице 11.1. Видно, что T_c для таких сверхпроводников лежат в интервале от нескольких тысячных Кельвина до температуры несколько меньших 10 К.

Многие металлические элементы не переходили в сверхпроводящее состояние вплоть до самых низких температур, при которых проводились измерения (несколько тысячных Кельвина). Так, сверхпроводимость пока не обнаружена у всех металлов первой группы, кроме цезия, который становится сверхпроводником при $T_c=1,5$ К под давлением 110 кбар. Под давлением переходят в сверхпроводящее состояние и ряд других элементов, например, As, Ba, Bi, Ce, Ge, Sb, P, Se и др.

Есть теоретические предсказания, что натрий и калий могут быть сверхпроводниками при температурах меньше, чем 10^{-5} К. Однако до настоящего времени нет достаточно обоснованного ответа на вопрос: могут ли все металлы (немагнитные) пере-

Таблица 11.1.* Температура сверхпроводящего перехода
для металлических элементов

Элемент	T_c, K	Элемент	T_c, K
Al	1,19	Re	1,7
Be	0,026	Ru	0,5
Cd	0,55	Sn	3,72
Ga	1,09	Ta	4,39
Hg	4,15	Tc	7,8
In	3,40	Th	1,37
Ir	0,14	Ti	0,39
La	4,8	Tl	2,39
Mo	0,92	U(α)	0,68
Nb	9,2	U(γ)	1,8
Os	0,65	V	5,3
Pa	1,3	W	0,012
Pb	7,2	Zn	0,9
		Zr	0,55

* Данные взяты из книг: В. Буккель. Сверхпроводимость. М.: Мир, 1975.

ходить в сверхпроводящее состояние при достаточно низких температурах.

Ферромагнитные металлы не являются сверхпроводниками. Более того, малейшие загрязнения сверхпроводящих металлов парамагнитными атомами (например, атомами Fe, Co, Mn и др.) могут полностью подавить сверхпроводимость.

Обнаружено также, что атомы примеси или структурные нарушения приводят к тому, что переход в сверхпроводящее состояние становится более плавным. Так, например, в структурно совершенных образцах чистого галлия переход наблюдается в интервале температур, равном 10^{-5} К. В загрязненных или дефектных кристаллах область перехода расширяется до $\approx 4 \cdot 10^{-2}$ К.

В настоящее время сверхпроводимость обнаружена у огромного числа сплавов и соединений. Критические температуры для некоторых из них приведены в таблице 11.2.

До 1986 г. наиболее высокотемпературным сверхпроводником оставался Nb_3Ge , имеющий $T_c = 23,4$ К. В 1986 г. Дж. Беднорц и К. Мюллер установили, что система $La-Ba-Cu-O$ испытывает сверхпроводящий переход при $T_c \approx 35$ К. Это открытие положило начало бурному исследованию высокотемпературных сверхпроводников. К настоящему времени твердо установлено, что в системе $Tl-Ba-Ca-Cu-O$ наблюдается переход при температуре 125 К. Характерно, что высокотемпературными сверхпроводниками являются не металлические соединения, а оксиды, обладающие в нормальном состоянии очень низкой электропроводностью. К моменту написания этой

Таблица 11.2. Температура сверхпроводящего перехода некоторых сплавов и соединений

Соединение	T_c, K	Соединение	T_c, K
TiO ₂	3,44	La _{2-x} Ba _x CuO ₄₋₆	35
La ₃ In	10,4	La _{2-x} Sr _x CuO ₄₋₆	40
Nb ₃ Au	11,5	YBa ₂ Cu ₃ O ₇₋₆	90
MoN	12,0	Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₆	85
NbN	16,0	BiSrCa _{n-1} Cu _n O _x	120
Nb ₃ Al	17,5	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x	125
Nb ₃ Sn	18,5	(0 < δ < 1)	
Nb ₃ Al _{0,8} Gc _{0,2}	20,9		
Nb ₃ Ge	23,4		

книги в литературе появились сообщения об обнаружении сверхпроводников с $T_c=168, 180$ и даже $240 K$. Однако в контрольных экспериментах такие значения T_c не были подтверждены.

11.3. ИДЕАЛЬНЫЙ ДИАМАГНЕТИЗМ

В 1933 году В. Мейсснер и Р. Оксенфельд, изучая распределение магнитного потока вокруг оловянных и свинцовых образцов, охлажденных в магнитном поле ниже температуры их сверхпроводящих переходов, обнаружили, что при $T < T_c$ магнитный поток выталкивается из образца (рис. 11.3). Таким образом, было установлено, что в сверхпроводящем состоянии образцы становятся идеальными диамагнетиками, в которых

магнитная индукция $\vec{B}=0$. Как выяснилось впоследствии, идеальный диамагнетизм присущ всем сверхпроводникам ($T < T_c$). Явление, заключающееся в том, что внутри сверхпроводника магнитная индукция равна нулю, получило название *эффекта Мейсснера—Оксенфельда*.

Отметим, что этот результат не является просто следствием исчезновения сопротивления, хотя в идеальном проводнике (с $\rho=0$) при определенных условиях и может возникнуть подобный эффект.

Действительно, из закона Ома $\vec{E}=\rho \cdot \vec{j}$ следует, что при конечном значении \vec{j} и $\rho \rightarrow 0$ электрическое поле в образце должно быть равно нулю. При этом условии, как видно из уравнения Максвелла,

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (11.2)$$

должно быть $\frac{d\vec{B}}{dt}=0$, т. е. магнитная индукция в образце